

研究展望

貯水池水理

RESERVOIR HYDRAULICS

安芸周一*

By Shuichi AKI

1. まえがき

貯水池水理に関する研究の工学的意義は、ダムのもつ主要な機能である治水・利水の効果を、水理学的な観点から最大限有効に発揮させる技術の開発・確立にあるといえよう。古くは洪水吐や減勢工の水理設計から近年の環境問題研究に至るまで、わが国の貯水池水理に関する研究は、水資源開発・電源開発の促進と流域の防災・環境保全に貢献してきた。

本文では、著者がこれまでに携わったことのある貯水池水理に関する研究のうち、現在も技術的に未解決で重要な課題が残されていると考えられるものをとり上げ、主として電力中央研究所における研究例を紹介しながら、今後の展望を述べることにしたい。

2. 貯水池水理にかかわる諸問題

貯水池水理にかかわる問題を大別すれば、①洪水時の問題、②土砂の問題、③水質の問題ということになる。

(1) 洪水時の問題

ダムによる洪水調節は、下流河川の治水計画の基本的条件の1つとして、古くから検討されてきた課題である。治水ダムではその本来の機能である洪水調節を最も効果的に行う必要があり、利水専用ダムでは河川の従前機能維持のために安全な放流を行わなければならない。しかし、洪水は不確実性の強い現象であり、種々の洪水への対応を経験することによって、ダム操作の適正化・合理

化を図っていくことが必要である。

昭和47年7月の豪雨による全国的な水害の発生は、ダムによる洪水調節の重要性が再認識される契機となり、翌48年建設省の通達によって設計洪水量、計画洪水波形等のダム操作規定の改定が行われた。さらに昭和53年には、「ダム設計基準」の第2次改定が行われ、その中で設計洪水量の見直しが行われている¹⁾。

貯水池における洪水時の問題として、流入量の予測、貯水池内の洪水挙動の把握、放流操作の最適化は、現在もなお未解決で重要な課題として残っている。これらのうち、貯水池内の洪水挙動の把握と放流操作の最適化に関しては、水理面からの研究が意外に進んでおらず、むしろ洪水挙動の不確実性、非線形性からLPやDP等の数値計画法や制御理論の応用による最適化の研究の方が多く行われている²⁾。

洪水追跡における貯水池の取扱いは、水面が水平状態で上下すると仮定して計算することが多いが³⁾、この場合は洪水が貯水池流入部からダム地点まで瞬時に伝播することになる。実際にはダム地点での放流条件によって貯水池内に定常波が発生するなど、洪水の挙動は複雑になり、それが流入量の把握やゲート操作を難しくする一因になっている。

本文では、この貯水池内の定常波の特性、洪水挙動の数値解析法およびそれらの応用としてのダムゲートの自動化について述べることにする。

(2) 土砂の問題

土砂の問題は、堆砂と濁水が主であるが、濁水は水質に含めて後述する。

堆砂問題とは、流域から流入した土砂が貯水池内に堆積し、貯水容量の減少や貯水池上流の河床上昇、下流の

* 正会員 工博 電力中央研究所我孫子研究所所長
(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

Keywords: flood wave, sediment discharge, water quality, stratified flow

河床低下等を引き起こす現象である。土砂の堆積は、ダムにとって避けられない現象であり、このため計画段階から堆砂容量が考慮されているが、流入土砂量の定量的な予測が難しく、計画以上の堆砂が進行してしまうこともある。特に、流域の土砂生産量が多い貯水池では、この問題は深刻である。

堆砂対策としては、流入土砂の抑制（またはバイパス）と堆砂の排除が考えられており、個々のダム管理者により浚渫等の対策がとられているほか、建設省「ダムの総合排砂対策」（昭和51～52年度）⁴⁾「ダム堆砂対策調査」（昭和53～54年度）⁵⁾や通産省「発電ダム堆砂排除総合システム開発調査」（昭和55～58年度）⁶⁾等の国の事業によっても具体化が進められている。

貯水池の堆砂問題については、すでに芦田⁷⁾による研究展望があるが、堆砂対策の中で、洪水放流時の掃流力を利用して堆砂を排除する排砂路方式は、貯水池水理にかかわる重要な課題であり、従来あまり積極的に使われていなかった排砂路の活用と設計の合理化が特に重要になってきていることから、本文ではこの課題についてやや詳細に述べることにする。

(3) 水質の問題

水質問題は、水温変化、濁水長期化および富栄養化の3つがよく知られているが、いずれも基本的には貯水池内での河川水の長期滞留が原因となって生じるもので、貯水池水理ときわめて密接に関係している。

水温変化は当初冷水問題として提起されたが、昭和30年代初頭までの研究によって一応の成果が得られ、対策として表層取水設備が普及した⁸⁾。この時期の研究は、まだ水質変化と貯水池水理との関連付けが不十分であったが、昭和40年代後半から濁水長期化問題、富栄養化問題の拡大と社会的関心の高まりに呼応して、活発な研究が展開されるようになった。その結果、貯水池の流動形態と水質変化の機構を解明し、それらを予測解析するための数値モデルが構築され、環境アセスメントや水質保全対策の検討に利用されている⁹⁾。またこれらの数値解析や水理実験の結果に基づき、濁水対策として選択取水設備が多くの貯水池に設置されるようになった¹⁰⁾。最近では単独の貯水池だけの問題にとどまらず、同一水系内のダム群の最適運用によって極力濁水軽減を図る方法等も検討されており¹¹⁾、選択取水設備の有効な運用方法についてはまだ検討の余地が残っている。

富栄養化現象は、流域の人間活動に伴う窒素・リン等の栄養塩負荷量の増大による急速な汚濁の進行が問題になっている。わが国では、昭和50年代に琵琶湖や霞ヶ浦などの自然湖沼の富栄養化が社会問題となり、59年7月の「湖沼法」や同年9月の窒素・リン排水基準等の行政措置がとられている。最近では、山間部に位置する

貯水池でも、畜産排水や農地排水等の負荷によって富栄養化問題が顕在化しつつある。陸水域の富栄養化現象の予測と対策については、数値モデルや栄養塩負荷削減、底泥処理、曝気循環等の研究が活発に行われているが¹²⁾、現象の複雑さのために現在のところ技術的に確立されたとはいいがたく、検討すべき課題は多い。

3. 洪水挙動

(1) 貯水池内の洪水伝播特性

河道における洪水は、波動と流動の位相がほぼ一致して伝播するが、貯水池内ではダム地点の水位条件や放流方式により、洪水の伝播特性が大きく異なる。

図-1は次の3つの条件、すなわち①ダム地点で自由越流の場合、②ゲート操作で貯水位を一定に制御する場合、③ダムがない（自然河道）場合のそれぞれについて、洪水波動と流量の伝播特性を概念的に表わしたものである¹³⁾。

①の場合、矢野・芦田・高橋¹⁴⁾の実験的検討によれば、波動の伝播速度は河川と湛水池の間の遷移領域で遅くなり、湛水池領域で見掛け上急激に速くなる。これは、洪水流入により長波の速度 \sqrt{gh} で湛水池領域を伝播する波動が、ダム地点で一部越流し、一部は反射して波動の往復による重ね合わせが起こり、湛水池領域の水面がほぼ水平状態で昇降するためである。一方流量の伝播速度は自然河道の場合より遅くなり、ダム地点で流量と波動

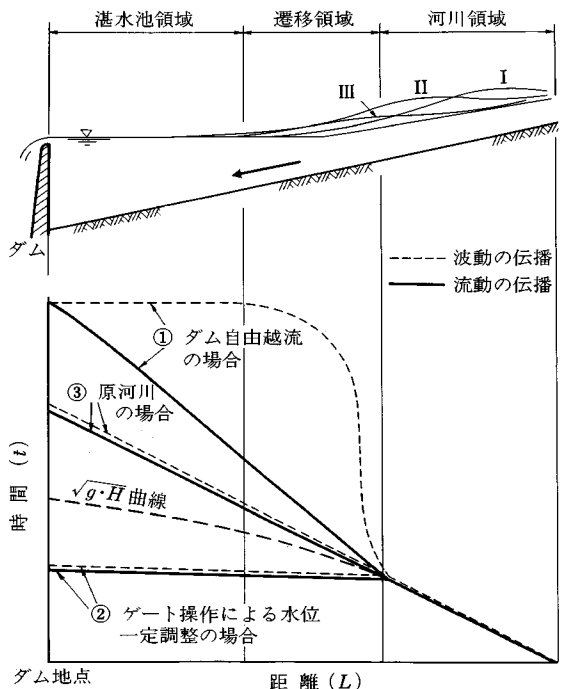


図-1 貯水池内の洪水の伝播¹³⁾

のピークの位相が一致する。このため、自由越流方式は、自然河道の場合よりも放流量のピークを遅らせ、低減させる効果をもつ。

これに対し、②の場合、湛水池領域での波動の速い伝播に応じて下流端の水位が一定となるようにゲート进行操作する結果、湛水池内にはダム地点を節とする定常波が発生するため放流量が変動し、自然河道の場合よりも放流量のピークが早くなることがある。定常波が発生すると、ダム地点での水位観測では貯水池への流入量を正しく把握することが難しく、貯水池の貯留効果を有効に使うことができなくなる。

定常波の特性について、秋元・尾崎¹⁵⁾は、運動方程式と連続式の波動成分の解析解を求め考察している。定常波は、ゲート操作により放流量を制御した場合あるいは水位を制御した場合に発生する。

放流量を制御した場合は、図-2のように貯水池の中央付近に節をもつ定常波が発生する。その周期 T は次式で与えられる。

$$\frac{T}{T_m} = \frac{\sqrt{2} \sqrt{h_e/h_0+1} \sqrt{h_e/h_0-1}}{h_e/h_0-1} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h_e : 下流端水深、 h_0 : 上流端水深。

T_m は基準周期で、貯水池長さを L 、平均水深を $h_m = (h_e + h_0)/2$ とすると、 $T_m = 2L/\sqrt{gh_m}$ で表わされる。

水位を制御した場合は、図-3のようにダム地点に節をもつ定常波が発生する。周期は $T_m = 4L/\sqrt{gh_m}$ とおいてやはり式(1)で与えられる。水位制御方式では放流量が変動するが、これについても解析解を求め、その特性を明らかにしている。

以上のような解析解により、定常波の特性を知ることができるが、実際の貯水池では洪水波形やゲート操作等

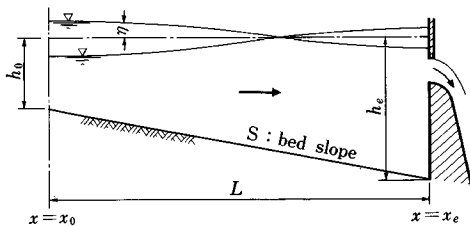


図-2 放流量を制御した場合の定常波¹⁵⁾

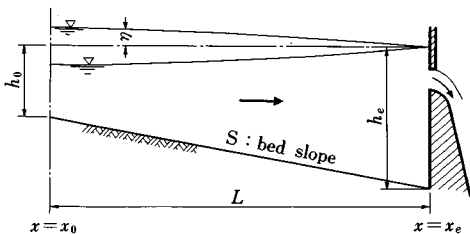


図-3 水位を制御した場合の定常波¹⁵⁾

の条件が複雑に変化するため、数値解析に頼らざるを得ない。

(2) 貯水池内の不定流解析

貯水池内の洪水挙動の数値解析法として、秋元¹⁶⁾は、特性曲線による不定流解析法を提案し、実際の貯水池への適用を図っている¹⁷⁾。

この解析法は、貯水池をいくつかの幅の異なる水路の組合せで近似し、一次元不定流の基礎式を数値計算するもので、特性方程式は以下のように表わされる。

$$\frac{dx}{dt} = u \pm \sqrt{gh} \dots\dots\dots (2)$$

$$d(u \pm 2\sqrt{gh}) = g(I - n^2 u^2 / R^{1/3}) dt \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 x : 距離、 t : 時間、 u : 断面平均流速、 h : 水深、 g : 重力加速度、 I : 水路勾配、 n : 粗度係数、 R : 径深。

水路の断面変化部における水理量の変化は、定常流の運動量方程式が成立するものと仮定して計算する。

この解析法は、貯水池形状の適切な近似方法が定まっていなかったことや、特性曲線上に解が求まるため複雑なゲート操作を考慮した解析を行うのが不便なこと等の問題があり、さらに一般的で実用的な数値計算法の開発が望まれる。

(3) ダムゲートの自動制御

ダムにおける複雑なゲート操作を迅速かつ確実にを行うために、ゲートの自動化が進められている。これは、貯水池あるいは放流量を制御するため、ゲート開度、放流量、ゲート開閉順位等を電算機が自動的に計算し、ゲート操作を行うものである。

しかし、先に述べた洪水時の貯水池内の波動が原因となってゲートのハンチング等の不安定現象が起こることがあり、より信頼性の高い制御系を確立するためには、貯水池水理の観点からも検討が必要と考えられる。

秋元¹⁸⁾は、実際にゲートの不安定現象が観測された貯水池を対象に、波動方程式の解を求め、定常波の発生が不安定現象の原因であることを明らかにしたうえで、さらにその対策として、貯水池縦断方向に定常波の半波長に相当する間隔で水位計を配置し、それらの平均水位によってゲートを制御する方法を提案している。また中村・佐々木¹⁹⁾は、水位データを定常波の周期をもつフーリエ級数で表わし、短周期成分を除去して平均水位を把握する方法を提案している。

こうした方法の妥当性は現在のところ検証が不十分であるが、自動制御の信頼性向上に対する要求が高まるにつれて、実用化のためにより精細な水理的検証が必要となるであろう。

4. 堆砂排除

(1) 堆砂および堆砂排除の実態

堆砂の実態に関しては、資源エネルギー庁が毎年度とりまとめている「発電用貯水池調整土砂堆積状況」²⁰⁾をみると、昭和63年3月31日現在で、ダム高15m以上の337地点のうち、総貯水容量に対する堆砂率80%以上が9地点、10%未満が過半数の187地点である。全体的にみれば堆砂が進行しているダムは少なく、堆砂率80%以上の9地点の大部分が土砂生産の多い中部・北陸地方に位置している。この点で現在のところ堆砂問題は地域性の強い問題であるといえよう。

堆砂排除は、掘削や浚渫等の機械的方法と排砂路・排砂管等の水理的方法に分けられる^{4), 21)}。

掘削は、貯水池上流部の粒径の大きいバックサンドを対象とするもので、天竜川水系美和ダム・小渋ダム等で実施されている⁵⁾。浚渫は、貯水池上流部の比較的粒径の小さい堆砂を対象とするもので、天竜川水系美和ダム・佐久間ダム⁵⁾、赤川水系八久和ダム²²⁾等で実施されている。特に佐久間ダムでは、浚渫土砂の輸送方法として管路によるスラリー輸送の検討が試みられ、スラリーの流動特性やライニング材の耐摩耗性等に関する実証試験データが収集されている²³⁾。

排砂管はダム底部に設けられ、ダム近傍の底泥を排出するものであるが、巨石や沈木等による閉塞の懸念や閉

塞後の補修の難しさから、実際に運用されている例は少ない。大井川水系井川ダムでは、昭和50年にダム点検のため、排砂管から放流して水位を低下させたが、その際に多量の流木が引き込まれたことや、シルト質の底泥が圧密により膠結していること等の問題があったことが報告されている²¹⁾。

排砂路はダムの中～底部に設けられ、洪水時にゲートを開放し、掃流力によって排砂を行うものである。わが国では大井川水系千頭ダム²¹⁾、黒部川水系出し平ダム²⁴⁾・宇奈月ダム²⁵⁾、海外ではスイスのGebidem Dam²⁶⁾、ベネズエラのSanto Domingo Dam²⁷⁾等が知られている。

(2) 大規模排砂路の設計

近年、わが国でも図-4に示す関西電力・出し平ダムの例にみられるように、本格的な排砂機能をもった大規模排砂路が設置されるようになってきた²⁴⁾。

排砂路の基本設計のフローを図-5に示す。

設計流量は、貯水池運用を考慮し、排砂に使える流量範囲と排砂時間から決定される。流量が決まると、開水路状態で流れ得る条件から排砂路の規模が決まる。排砂路勾配は、砂礫の掃流限界と水路床の摩耗・損傷限度から決定される。排砂路のダムに対する設置高さは、排砂によって計画貯水容量が確保できるように決定される。

排砂路設計の検討項目のうち、流下砂礫による摩耗・損傷対策については従来経験に頼っていたが、石橋²⁸⁾は

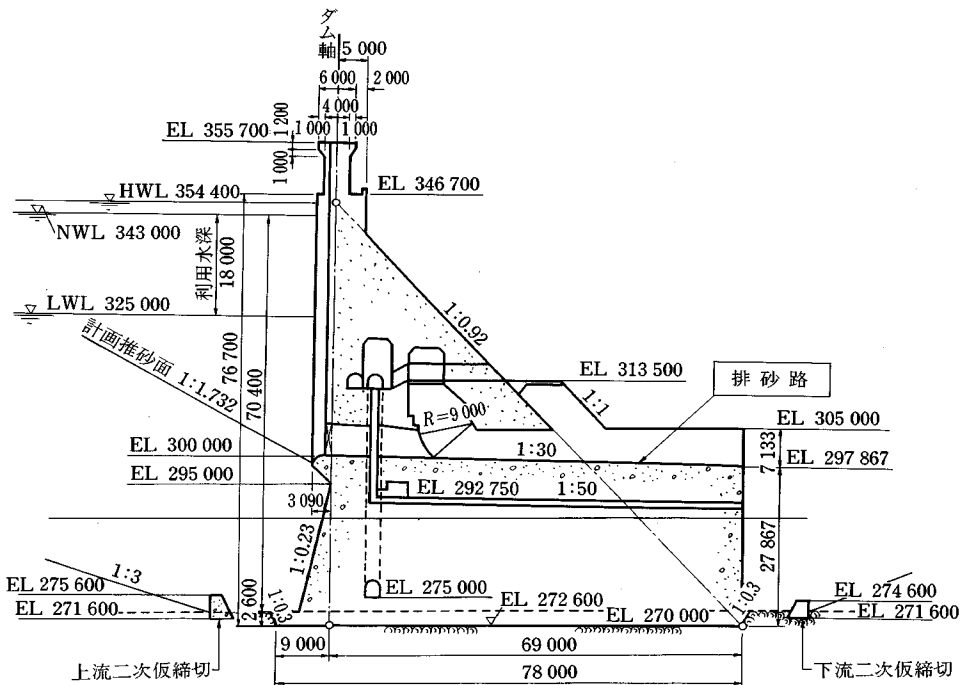


図-4 出し平ダムの排砂設備²⁴⁾

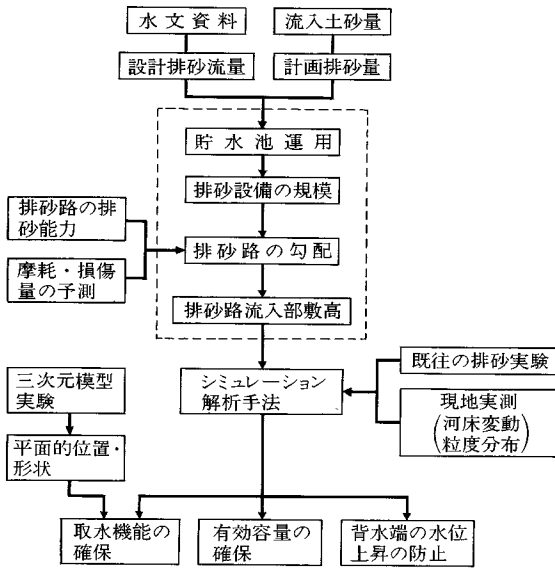


図-5 排砂路基本設計の考え方

砂礫の運動エネルギーと摩擦力による仕事量に基づく以下のような水理学的解析手法を提案している。

この方法では、水路床の摩擦・損傷量 D (m³/年) は次式で与えられる。

$$D = a_1 E + b_1 W \dots\dots\dots (4)$$

$$E = a_2 Q_s \Delta x \sum (f_i^{5/3} n_i) / (d_i^{1/3} l_i) \dots\dots\dots (5)$$

$$W = b_2 Q_s \Delta x \sum (f_i^{5/3} n_i \phi_i) / (d_i^{1/3} l_i) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 E ：水路床の Δx 区間に衝突する砂礫の総運動エネルギー (kg・m/年)、 W ：水路床の Δx 区間における砂礫の摩擦力による総仕事量 (kg・m/年)、 Q_s ：総流砂量 (m³/年)、 f_i ：粒径 d_i の粒子 1 個が水路床に衝突するときの衝撃力、 n_i ：流砂単位体積中の粒径 d_i の粒子数、 l_i ：粒径 d_i の粒子の saltation 距離、 ϕ_i ：粒径 d_i の粒子の水路床への衝突角度、 a_1, a_2, b_1, b_2 ：水路材料の特性によって決まる係数。

f_i, l_i, ϕ_i は、掃流力および水路形状の関数で表わされる。

こうした水理学的検討に基づく手法によって、摩擦・損傷対策に関し、より合理的な設計が可能になりつつある。

大規模排砂路の実績は、わが国ではまだ少なく、今後の設置地点の増加と排砂データの蓄積によって、水理設計の合理化を図っていく必要がある。

5. 水質現象

(1) 貯水池の水温特性と水質変化

貯水池の築造は自然河川上に熱容量の大きい巨大な水塊を形成させることである。この昇温期には熱されにくく、

降温期には冷めにくい巨大な水塊は、立地地点の水文・気象・貯水池運用等の条件により、特有の水溫構造を有するようになる。この水溫構造は密度構造として、貯水池内に密度流を誘起し、河川水の貯水池内での滞留機構を支配する。そして河川水自体の水質とこの滞留機構との関係によって種々の水質現象が生じるのである。したがって、貯水池の水溫特性は水質現象を論じるうえで重要な因子である。

貯水池の水溫特性は、よく知られているように成層型と混合型に大別される。成層型は貯水池規模に比べて池内の流れが弱い大規模貯水池にみられる。夏季を中心に安定な水溫成層が形成され、このとき水溫分布は水平方向にはほぼ一様で鉛直方向にのみ変化する。鉛直方向の密度勾配によって上下の混合が抑制され、流入・流出による流れは水平な層状を呈し、池内は層状の流動部分と停滞部分に分かれる。秋季から冬季にかけては、池内は表層から冷却され、鉛直方向の密度分布が不安定となって対流混合が生じ、水溫成層は表層からしだいに消滅していく。対流混合が全水深に及ぶときを大循環とよび、このとき池内の水溫分布はほぼ一様となる。

混合型は池内の流れが速く、強い混合を受ける中、小規模の貯水池にみられ、水溫分布は年間を通してほぼ一様である。混合型貯水池では池水の滞留時間が短いため、一般にそれほど深刻な水質問題は生じないと考えてよい。

貯水池の水溫特性の詳細は、後述する貯水池流動形態

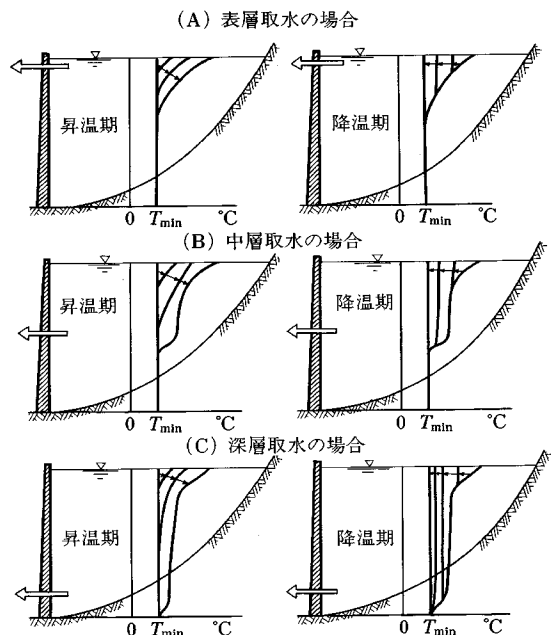
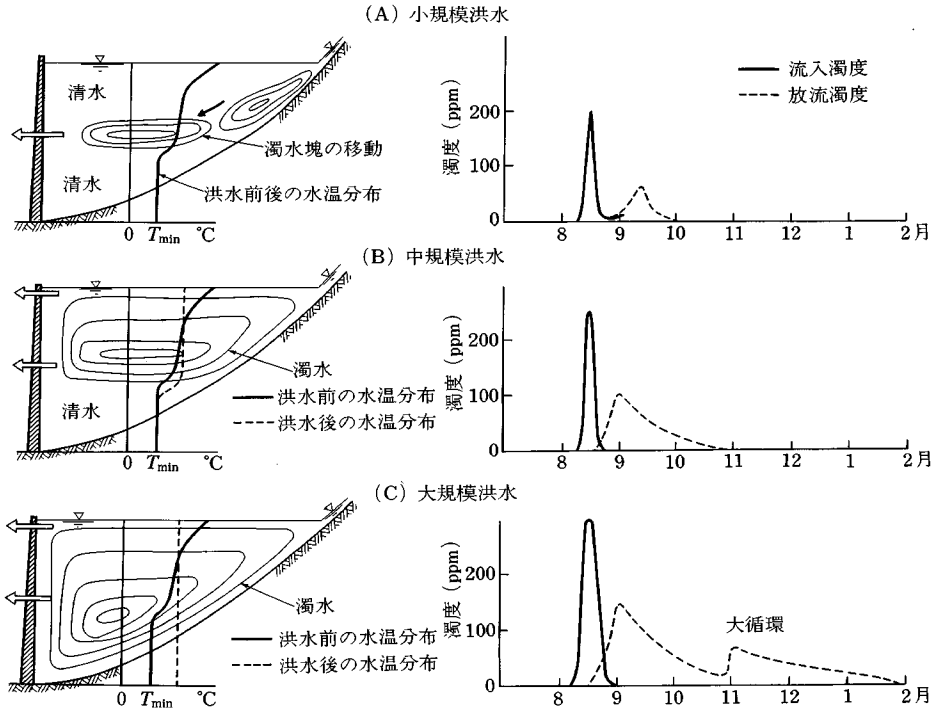


図-6 成層型貯水池の水溫構造



図一七 濁水現象の形態 (中層取水時)

の数理モデルによって精度よく予測することができるが、成層型・混合型の判定のみであれば、経験的に次の2つの指標を用いて行うことができる²⁹⁾。

$$\alpha = \text{年間総流入量} / \text{貯水池総容量}$$

$$\beta = - \text{洪水総流入量} / \text{貯水池総容量}$$

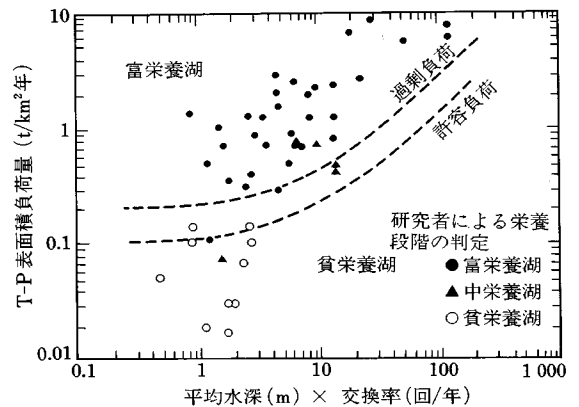
従来の観測によると、 $\alpha < 10$ ならば安定した成層型、 $\alpha > 20$ ならば混合型になる。成層型貯水池でも $\beta > 1$ のような大洪水が流入すると、一時的に混合型になってしまうことがある。 $\beta < 0.5$ 程度の洪水は貯水池の水温構造に大きな影響は与えない。

水温変化現象は、成層型貯水池の水温構造と取水口高さによって、流入水温と流出水温との間に差を生じる現象である。この現象を模式的に示すと図一六のようになる。

濁水長期化現象は、洪水時の濁水を貯水池内に貯留し、これを長期にわたって下流に放流する結果、下流河川の濁水期間が長期化する現象である。濁水を構成する物質は、ウォッシュロードの中でも特に細かい粒径数 μm 程度の粘土粒子が中心と考えられている。これらの粒子は難沈降性で、水とは容易に分離せず、濁水は密度流として貯水池内を流下する。この状況は洪水規模 β と取水口高さによって異なり、図一七に中層取水時の例を模式的に示す。

富栄養化現象は、栄養塩の供給と、安定な水温成層の

形成によって、貯水池表層に藻類 (植物プランクトン) が繁殖し、これに伴って DO, COD などの水質の悪化や水道用水のかび臭発生、水の華などの景観悪化を生じる現象である。水温や濁度のように模式的に表わすことは難しいが、Vollenweider³⁰⁾ は、ボックスモデルを用いた考察から、栄養塩負荷量と平均水深×貯水交換率によって、図一八のように自然湖沼の栄養水準の分類を行っている。この考え方を貯水池にも適用すると、同じ栄養塩負荷量であれば平均水深×貯水交換率が小さいほど富栄養化しやすく、混合型より成層型の方がより問題



図一八 リン負荷量と平均水深×交換率の関係 (自然湖沼)³⁰⁾

となりやすいことがわかる。

(2) 貯水池流動形態の解析法

貯水交換率が極端に小さい貯水池では、流入・流出が水温成層と水質に及ぼす影響は小さく、水温成層の形成は日射と風による混合によってほぼ説明できる。したがって、以下に述べる貯水池流動形態の解析法は、流入・流出が水温成層と水質に顕著に影響するような成層型貯水池を対象とするものである。

貯水池流動形態の解析法として現在実用化されているものは、次の4つである。

- ① ボックスモデル
- ② 鉛直次元モデル
- ③ 水平・鉛直二次元モデル
- ④ 密度流モデル

ボックスモデルは、貯水池を水質特性に応じていくつかの領域に分割し、各領域間の移動水量を計算するものである。この方法ではボックス間の移動水量を何らかの方法で推定しなければならない。芦田ら³¹⁾は、貯水池を3領域(一次元移流分散域、二次元移流拡散域および停滞域)に分け、各領域の流れ場を解析的に求めている。室田ら³²⁾は、貯水池を鉛直方向に3層に分け、選択取水理論に基づくダムでの取水流動の解析法を示している。

鉛直次元モデルは、流入・流出に伴う貯水池内流動層の範囲と流速分布を計算するものである。初期のモデルとしては吉川・山本³³⁾、Ryan・Harleman³⁴⁾のモデルが代表的であり、その後、安芸・白砂³⁵⁾、岩佐ら³⁶⁾がより実用的なモデルを構築している。代表例として、安芸・白砂のモデルの概要を図-9に示す。このモデルは

Ryan・Harlemanのモデルを基礎とし、水理実験を行って流動の計算方法に改良を加えたものである。流動の計算方法の基礎となっているのは、密度成層場での取水流動に関するYih³⁷⁾、日野・大西³⁸⁾などの選択取水理論である。

安芸・白砂のモデルは、水質予測のための改良が種々加えられているが、最近では富栄養化対策としての曝気循環を考慮した解析法が松梨・宮永³⁹⁾によって示されている。

水平・鉛直二次元モデルは、貯水池内の流下方向と鉛直方向の二次元的な速度場を計算するものである。宮永ら⁴⁰⁾は、安芸・白砂のモデルを基礎に、鉛直流速が水平方向に一樣と仮定した二次元速度場の計算方法を示した。この方法は、濁水塊の伝播解析に用いられているが、貯水池の水温分布(密度分布)を鉛直一次的に取り扱い、かつ運動方程式を直接解いていないため、適用範囲は限定されるものの、計算時間があまりかからないので実用性は高い。これに対し、岩佐ら⁴¹⁾、森北ら⁴²⁾のモデルは、運動方程式を直接解くものである。貯水池水理モデルの精度向上を図っていくうえでは、この方法が正攻法と考えられるが、種々の外力条件に対するモデルの検証と、長期間の計算のための計算時間短縮による実用性の向上が今後の課題であろう。

岩佐らのモデルは実用性を高めるための検討が種々行われており、最近では松尾・岩佐⁴³⁾が支川の合流を考慮した解析法を示している。

なお三次元の流動モデルについては、自然湖沼を対象に岩佐ら⁴⁴⁾、富所⁴⁵⁾などが解析を試みている。

密度流モデルは、貯水池内に洪水が流入した場合などに形成される密度フロントの挙動を計算するものである。福岡・福嶋⁴⁶⁾は、一連の実験的研究をもとに成層型貯水池内で分岐する密度流の解析法を示した。このモデルは洪水の貯水池内挙動を理解するうえで有効なものと考えられる。

以上、成層型貯水池内の流動を解析するモデルについて述べたが、これらのモデルを補うものとして、貯水池流入部での河川水の潜り込みによる混合を扱った福岡ら⁴⁷⁾、菅・玉井⁴⁸⁾や、水面の放射冷却による対流混合を扱った浅枝ら⁴⁹⁾等の研究は、現象の理解を深め、モデルの適合性を高めるための改良を加えるのに役立つものと考えられる。

(3) 水質変化の予測

水温の予測モデルは、大気との熱収支、河川水の流入と貯水の流出および貯水池内部の流動と混合による熱輸送によって記述される。

この種のモデルとしてよく知られているのが先

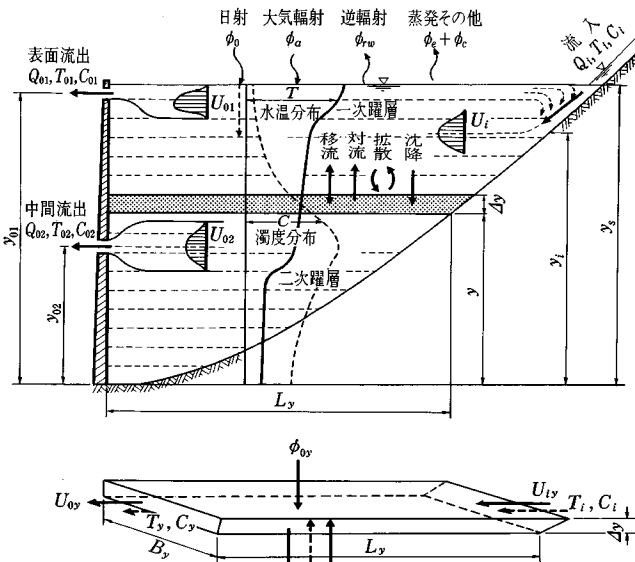


図-9 貯水池流動形態の鉛直次元モデル³⁵⁾

に述べた Ryan・Harleman の鉛直一次元モデル³⁴⁾である。このモデルは、その後わが国における貯水池水温予測の研究に大きな影響を与えた。このモデルをより実用的に改良した安芸・白砂³⁵⁾のモデルは、わが国の種々の貯水池の水温予測に適用され、その適合性が実証されている。

水温の予測は多くの場合、鉛直一次元モデルで実用的には十分であるが、岩佐ら⁴¹⁾は洪水による成層破壊のような現象に対しては、二次元モデルの方が有効であるとしている。

濁度の予測モデルは、水温モデルに濁質の収支式を加えたものが一般的である。代表的なものとしては、芦田ら³¹⁾のボックスモデル、安芸・白砂³⁵⁾の鉛直一次元モデル、岩佐ら⁴¹⁾の水平・鉛直二次元モデルがある。各モデルの違いは先に述べた流動の解析方法の違いであるが、濁質の挙動の取扱いはほぼ同じである。その後、中村・足立⁵⁰⁾、宮永・安芸⁵¹⁾等によって、濁質の粒度分布および光学特性の重要性が指摘され、これらを取り入れることによって濁度予測精度の向上が図られている。また小暮・首藤⁵²⁾は、貯水位が低下したとき上流端で堆積底泥が巻き上げられることによる濁水現象の解析法を示している。このほか放熱期の対流混合による深層の濁水の巻き上げや、水温躍層下部での濁水フィンガーのような密度不安定現象⁵¹⁾等の解明が、濁度予測精度向上のための今後の課題として挙げられる。

富栄養化モデルは、水域における栄養塩の挙動とそれに伴う生物活動および水質変化を水理モデルと組み合わせで解析するものである。

貯水池の成層流を考慮したモデルとしては、岩佐ら⁵³⁾、宮永・白砂⁵⁴⁾、森北ら⁵⁵⁾等のモデルがある。

図—10 は、一例として宮永・白砂のモデルの生態系の構造を示したものである。このモデルは、プランクトンの増殖特性等の生物化学的パラメーターを適切に与えることによって、実際現象をある程度まで説明することができ、富栄養化予測にも使えるものと考えられるが、水温や濁度の場合に比べると現象の複雑さや観測データ

の不足のために精度や汎用性が十分とはいえず、改善すべき点を残している。このことは、他の富栄養化モデルについても同様である。

富栄養化モデルの精度向上を図っていくためには、現在のところ、水理モデルよりも不明確な点の多い底泥の水質への影響や生態系モデルの検討が先決と思われる。たとえば、水面付近に植物プランクトンが集積する「水の華」と呼ばれる現象は、上述の富栄養化モデルでは説明できず、須藤・岡田⁵⁶⁾のように植物プランクトン自身の鉛直移動機構のモデル化が必要になる。これは、近年各地のダム貯水池で問題となりつつある「淡水赤潮」⁵⁷⁾についても同様である。このような意味で、生物対流現象を扱った渡辺・原島⁵⁸⁾や生態系のカオスの挙動を扱った神田・日野⁵⁹⁾の研究などは新しい方向を探るものであり、水理モデルとのバランスのとれた生態系モデルの発展が今後期待される。

(4) 水質保全対策

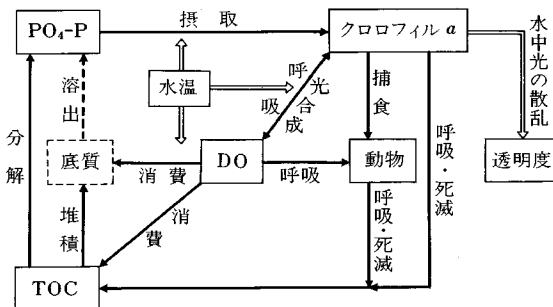
貯水池水質予測に関する従来の研究により、水質問題に対するいくつかの対策が提案されている。

水温変化・濁水長期化に関しては、選択取水法の有効性が実証され、わが国の貯水池では数多くの実施例がある¹⁰⁾。この方法は密度成層場での選択取水理論に基づき、取水口の位置を選択することによって放流水の水温・濁度を制御するもので、図—11 に一例として九州電力・一ツ瀬貯水池の選択取水設備を示す³⁵⁾、⁶⁰⁾。

選択取水設備に関しては、運用実績と水質予測モデルによる検討等により、その最適運用を図っていくことが必要である。

選択取水以外の濁水対策としては、流域の崩壊防止、濁水のバイパス、貯水池運用（濁水早期放流）、汜過および凝集剤処理等が考えられるが、凝集剤以外の方法は、実施が困難であったり、十分な効果を挙げるのが難しい場合が多い。凝集剤は水道用貯水池での使用例があるが、大規模貯水池に適用する際には、経済性・安全性の両面からの検討が必要であり、技術的にも濁水処理のシステム化が課題である。

富栄養化に関しては、いうまでもなく流域からの栄養塩負荷の削減が抜本的な対策であるが、社会的・経済的に大規模な実施が困難なことが多い。そこで、抜本的な対策とはいえませんが、貯水池内部で実施できる方法として、底泥処理、薬品散布、鉛直混合等が行われている。このうち鉛直混合は、気泡噴流や機械的攪拌により貯水池の水温成層を破壊して水質改善を図るものであり、貯水池水理の観点から興味深く、近年小規模な水道用貯水池を中心に急速に普及しつつあり⁶¹⁾、またいくつかの大規模貯水池でも実証試験が行われている⁶²⁾。図—12 に一例として建設省・釜房貯水池に設置された鉛直混合用



図—10 貯水池生態系モデル⁵⁴⁾

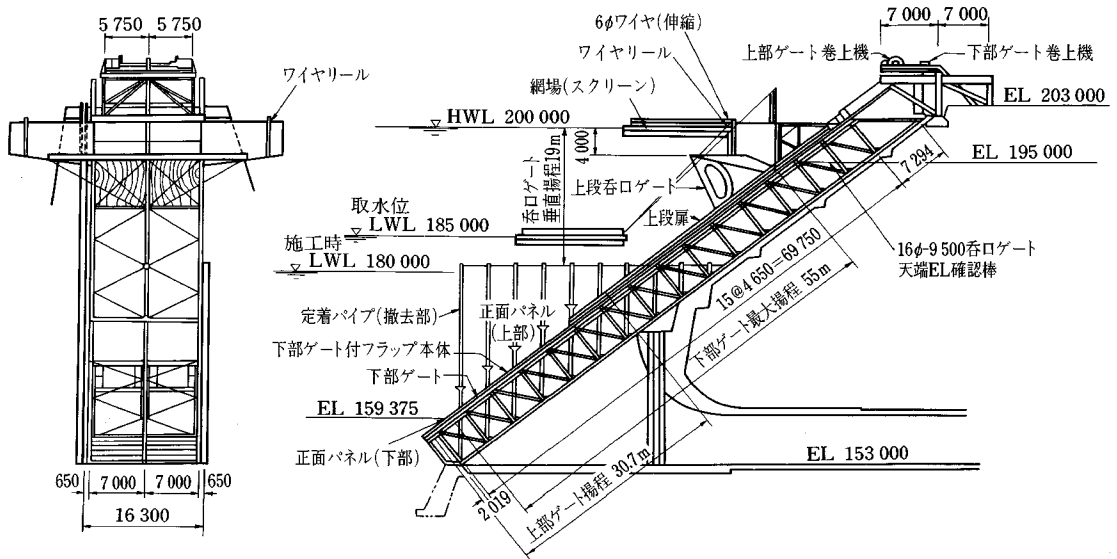


図-11 一ツ瀬貯水池の選択取水設備³⁵⁾

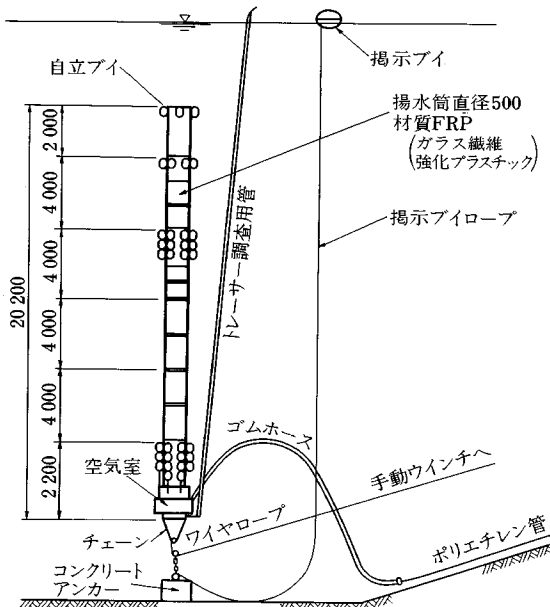


図-12 釜房貯水池の空気揚水筒⁶²⁾

の空気揚水筒を示す。

鉛直混合法そのものは、特に目新しいものではなく、欧米では1950年代から活発に研究が行われている⁶³⁾しかし、これらは現地実験等による実証的調査が大部分で、水質変化の機構が十分解明されたうえでの対策として確立されたものではない。

気泡噴流による鉛直混合の水理に関しては、海岸工学の分野で空気防波堤等を対象にした Kobus⁶⁴⁾の解析法

を基礎に、岩佐ら⁶⁵⁾や松梨・宮永³⁹⁾によって貯水池への適用が図られている。さらに宮永⁶⁶⁾は、気泡噴流による流動を考慮した富栄養化予測モデルを構築し、鉛直混合が生物活動に及ぼす影響の理論的考察に基づいて、気泡噴流による水質改善の定量的評価法を提案している。

水理的な方法による富栄養化対策としては、このほかに選択取水法も提案されているが⁶⁷⁾、鉛直混合も含めてこうした方法の根拠となる富栄養化モデル自体が先に述べた精度・信頼性の問題を含んでおり、今後の現地での検証の蓄積によって技術的に確立されることを期待したい。

6. 結 語

貯水池水理にかかわる諸問題のうち、洪水伝播、堆砂排除、水質変化に関し、現在も技術的に未解決で重要と考えられる課題について述べた。これらは、貯水池の適切な管理、運用および環境保全を図っていくうえでいずれも重要な課題であり、今後の水資源開発とその利用に貢献するため、活発な研究活動が展開されることを願うものである。

参 考 文 献

- 1) 日本大ダム会議：第2次改訂ダム設計基準，pp.3～6，1978.
- 2) 高樟琢馬・池淵周一・小尻利治：水量制御からみたダム群のシステム設計に関する DP 論的研究，土木学会論文報告集，No.241，pp.39～50，1975.
- 3) 河西 基・白砂孝夫：河道・貯水池系の洪水伝播解析，第27回水理講演会論文集，pp.17～22，1983.

- 4) 建設省河川局開発課：ダムの総合排砂対策について，1978.
- 5) 建設省中部地方建設局天竜川統合管理事務所：ダム堆砂対策調査報告書，1979.
- 6) 通商産業省資源エネルギー庁：発電ダム堆砂排除総合システム開発調査，1984.
- 7) 芦田和男：土砂の生産・流出現象と災害，土木学会論文集，No. 393/Ⅱ-9，pp. 21~32，1988.
- 8) 河川水温調査会：水温利用に関する研究報告書，1962.
- 9) 安芸周一・下田 修・白砂孝夫・赤崎俊夫・宮永洋一・坂田昌弘：貯水池水質の調査と解析，電力中央研究所報告，総合報告，No. 302，pp. 119~156，1982.
- 10) 米澤卓志：貯水池の表面取水設備—主として濁水対策，土木技術，Vol. 30，No. 6，pp. 33~44，1975.
- 11) 中村俊六・神谷将弘：飛驒川濁水長期化現象軽減について，電力土木，No. 177，pp. 10~28，1982.
- 12) 合田 健：湖沼水質保全の今後の動向，第6回日本水質汚濁研究協会セミナー，pp. 15~49，1985.
- 13) 秋元 保・藤本 健：貯水池内の洪水の挙動と放流方法の検討，電力中央研究所技術第二研究所報告，No. 72020，1973.
- 14) 矢野勝正・芦田和男・高橋 保：境界条件による洪水流の変形に関する研究，第9回水理講演会講演集，pp. 13~18，1965.
- 15) 秋元 保・尾崎幸男：河川の洪水対策に関する研究（その2）—貯水池における洪水挙動に関する考察，電力中央研究所報告，No. 378016，1978.
- 16) 秋元 保：河川，貯水池内における不定流の解析，電力中央研究所技術研究所研究報告，No. 69013，1969.
- 17) 秋元 保・工藤正介：河川の洪水対策に関する研究（その1）—貯水池内洪水伝播挙動に関する現地実験，電力中央研究所報告，No. 376015，1977.
- 18) 秋元 保・北見恒雄・滝川 清：河川の洪水対策に関する研究（その3）—ダムゲートの自動制御に関する検討，電力中央研究所報告，No. 379537，1979.
- 19) 中村 昭・佐々木元：貯水池水位変動が流入量把握に及ぼす影響とその対策，土木技術資料，Vol. 23，No. 5，pp. 21~26，1981.
- 20) 資源エネルギー庁公益事業部発電課：昭和62年度発電用貯水池調整池土砂堆積状況，電力土木，No. 216，pp. 162~169，1988.
- 21) 多田尚夫：ダム貯水池の堆砂問題の展望と対策，第11回ダム技術講演討論会テキスト，pp. 16~27，1979.
- 22) 多田省一郎：貯水池・調整池の堆砂対策，第30回電力土木講習会テキスト，pp. 130~139，1988.
- 23) 岡田 剛・馬場恭平：佐久間貯水池堆砂とその排除計画について，大ダム，No. 102-103，pp. 84~93，1982.
- 24) 杉木 清：出し平ダムの設計について，第16回ダム技術講演討論会テキスト，pp. 42~60，1984.
- 25) 高須修二：宇奈月ダム排砂設備の水理設計および模型実験，大ダム，No. 102-103，pp. 74~83，1982.
- 26) Dawans, P. : Le degrevement de la retenue de Gebidem : essais sur modele et experiences sur prototype, Trans. 14th Int. Congress Large Dams, Vol. 3, pp. 383~407, 1982.
- 27) Krumdieck, A. et al. : Sediment flashing at Santo Domingo reservoir, Inter. Water Power & Dam Construction, Vol. 31, pp. 25~30, Dec., 1979.
- 28) 石橋 毅：ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究，土木学会論文報告集，No. 334，pp. 103~112，1983.
- 29) 安芸周一：既設貯水池の濁水現象，第16回発電水力講習会テキスト，pp. 78~92，1974.
- 30) Vollenweider, R. A. : Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in Limnology, Schweiz. Z. Hydrol., Vol. 37, No. 1, pp. 53~84, 1975.
- 31) 芦田和男・江頭進治・古谷 健：密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究（4）—貯水池濁度の解析法を中心として，京都大学防災研究所年報，No. 22B-2，pp. 383~398，1979.
- 32) 室田 明・道奥康治・狭間 滋：混合層模型による貯水池水温構造の予測，第29回水理講演会論文集，pp. 395~400，1985.
- 33) 吉川秀夫・山本晃一：貯水池の水の挙動に関する研究，土木学会論文報告集，No. 186，pp. 39~54，1971.
- 34) Ryan, P. J. and Harleman, D. R. F. : Prediction of the annual cycle of temperature changes in a stratified lake or reservoir, MIT Rep. No. 137, 1971.
- 35) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池濁水現象の調査と解析（その2）—成層型貯水池の流動形態と選択取水の数値解析，電力中央研究所技術第二研究所報告，No. 74506，1974.
- 36) 岩佐義朗・野口正人・児島 彰：貯水池内の水温成層予測法について，京都大学防災研究所年報，No. 18B，pp. 565~573，1975.
- 37) Yih, C. S. : On the flow of a stratified fluid, Proc. 3rd U. S. Nat. Cong. Appl. Mech., pp. 857~861, 1958.
- 38) 日野幹雄・大西外明：密度成層流におよぼす point sink の高さの効果，土木学会論文報告集，No. 163，pp. 39~48，1969.
- 39) 松梨史郎・宮永洋一：曝気による貯水池内の流動のシミュレーション，第31回水理講演会論文集，pp. 629~632，1987.
- 40) 宮永洋一・秋元 保・石橋 毅・白砂孝夫・斎藤 茂・尾崎幸男：貯水池流動形態のシミュレーション解析手法，電力中央研究所報告，No. 378022，pp. 16~18，1979.
- 41) 岩佐義朗・松尾直規・遠道正昭：洪水時における貯水池の成層破壊について，京都大学防災研究所年報，No. 20B-2，pp. 259~270，1977.
- 42) 森北佳昭：貯水池流れと水温・濁度の二次元数値解析モデル，第31回水理講演会論文集，pp. 521~526，1987.
- 43) 松尾直規・岩佐義朗：合流部を有する貯水池の富栄養化シミュレーション，第29回水理講演会論文集，pp. 359~364，1985.
- 44) 岩佐義朗・井上和也・劉 樹坤・阿倍 徹：琵琶湖湖流の三次元的な解析，京都大学防災研究所年報，No. 26B-2，pp. 531~542，1983.
- 45) 富所五郎：閉鎖浅水域における流れと拡散の三次元数値解析法，第32回水理講演会論文集，pp. 299~304，1988.
- 46) 福岡捷二・福嶋祐介：成層化した二次元貯水池中で分岐

- する密度流の解析的研究, 土木学会論文報告集, No. 294, pp. 73~84, 1980.
- 47) 福岡捷二・福嶋祐介・中村健一: 2次元貯水池密度流の潜り込み水深と界面形状, 土木学会論文報告集, No. 302, pp. 55~65, 1980.
- 48) 菅 和利・玉井信行: 貯水池流入部の潜り点及び初期混合に関する研究, 第25回水理講演会論文集, pp. 631~636, 1981.
- 49) 浅枝 隆・玉井信行・高橋由多加: 表層冷却時の対流形成に関する研究, 第25回水理講演会論文集, pp. 643~650, 1981.
- 50) 中村俊六・足立昭平: 濁水化貯水池における濁質粒度の変動, 土木学会論文報告集, No. 279, pp. 61~68, 1978.
- 51) 宮永洋一・安芸周一: 濁質粒度が貯水池濁水現象に及ぼす影響について, 土木学会論文報告集, No. 296, pp. 49~59, 1980.
- 52) 小暮和史・首藤伸夫: 貯水池における濁度物質の堆積と洗掘, 第24回水理講演会論文集, pp. 265~270, 1980.
- 53) 岩佐義朗・松尾直規・森北佳昭: 貯水池における富栄養化の数値解析, 京都大学防災研究所年報, No. 24B-2, pp. 397~409, 1981.
- 54) 宮永洋一・白砂孝夫: 貯水池富栄養化現象の数値シミュレーションモデル, 電力中央研究所報告, No. 383044, 1984.
- 55) 森北佳昭・振井茂宏・三浦 進: ダム貯水池水質の予測と保全対策について, 第29回水理講演会論文集, pp. 365~370, 1985.
- 56) 須藤隆一・岡田光正: アオコによる水の華の生成, 日本河川水質年鑑研究編, pp. 817~828, 山海堂, 1980.
- 57) 大野世音男・喜多村雄一: 貯水池淡水赤潮問題の現状と対策, 電力土木, No. 199, pp. 86~97, 1985.
- 58) 渡辺正孝・原島 省: 生物対流の発生とその機構について, 第27回水理講演会論文集, pp. 199~206, 1983.
- 59) 神田 学・日野幹雄: 湖沼生態系の数値モデルによる解析, 第32回水理講演会論文集, pp. 257~262, 1988.
- 60) 緒方芳二・村上 任・落合正治: 一ツ瀬ダム選択取水設備の運用実績と効果について, 電力土木, No. 168, pp. 69~80, 1980.
- 61) 小島貞男: 湖水強制循環による富栄養化対策, 水質汚濁研究, Vol. 5, pp. 251~257, 1982.
- 62) 藤本 成・森北佳昭: ダム貯水池における水質現象とその対策, 第19回ダム技術講演討論会テキスト, pp. 32~58, 1987.
- 63) Lorenzen, M. and Fast, A. : A guide to aeration/circulation techniques for lake management, U. S. EPA, 1977.
- 64) Kobus, H. E. : Analysis of the flow induced by air-bubble systems, Coastal Engrg. Conf., London, Vol. II, pp. 1016~1031, 1968.
- 65) 岩佐義朗・松尾直規・尾沢卓思・南部茂美: エアレーションにより生じる流れの数値解析, 京都大学防災研究所年報, No. 27B-2, pp. 393~408, 1984.
- 66) 宮永洋一: 貯水池富栄養化現象の予測と気泡噴流による水質改善に関する基礎的研究, 東京工業大学学位論文, 1988.
- 67) 高田利彦: 選択取水によるプランクトンの発生制御について, ダム技術, Vol. 4, No. 1, pp. 35~41, 1986.

(1989. 3. 31・受付)